

砾石覆盖固沙措施水土保持作用研究

——以库布齐沙漠北缘为例

谭立海¹, 张伟民¹, 边凯¹, 高扬¹, 钟帅²

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠研究站, 兰州 730000; 2. 亿利资源集团, 内蒙古 东胜 017000)

摘要:库布齐沙漠发展沙产业, 风沙防护是必要举措。通过风洞试验与野外观测探讨了砾石覆盖固沙措施的风沙防护效益及其对土壤温湿度的影响, 旨在为砾石覆盖在库布齐沙漠防风固沙中的应用提供科学依据。研究表明: 3 cm 粒径砾石床面具有显著的防风固沙效应: 10~16 m/s 试验风速下, 10%~90% 覆盖度砾石床面风蚀防护效应介于 49.4%~100%, 其中, 50% 覆盖度砾石床面空气动力学粗糙度达到最大值, 风蚀防护效应在 96% 以上, 已达到理想的防风固沙效果。鉴于库布齐沙漠风况特征, 从工程防护角度讲, 40% 覆盖度砾石覆盖固沙措施能够达到防风蚀的目的, 风蚀防护效应在 93% 以上, 且能起到白天降温、夜间保温的作用, 减少极端气温对作物的伤害, 还能提高土壤含水量。本研究可为砾石覆盖固沙措施在干旱区风蚀防护中的应用提供借鉴作用。

关键词:砾石覆盖; 风蚀; 土壤温湿度; 库布齐沙漠

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0172-07

Effect of Gravel Mulch on Soil and Water Conservation

— A Case Study in the Northern Edge of Hobq Desert

TAN Lihai¹, ZHANG Weimin¹, BIAN Kai¹, GAO Yang¹, ZHONG Shuai²

(1. Dunhuang Gobi Desert Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Eilian Resources Group, Dongsheng, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: The control of wind erosion is crucial to the development of deserticulture in the Hobq Desert. This study discussed the protective effect of gravel mulch against wind erosion as well as its influence on soil temperature and humidity through wind tunnel experiments and field observation, aiming to provide the scientific basis for the application of gravel mulch to wind erosion control in the Hobq Desert. The results show that gravel beds composed of gravels in 3 cm diameter have significant effect of wind-reducing and erosion control, and the inhibition ratio of wind erosion ranges 49.4%~100%. Under experimental wind speeds of 10 to 16 m/s and as gravel coverage reaching 50%, gravel beds are aerodynamically stable, and the inhibition ratio of wind erosion is more than 96%. In aeolian engineering, gravel mulch in coverage of 40%, with a wind erosion inhibition ratio of more than 93%, can achieve the purpose of preventing wind erosion in the Hobq Desert. Meantime, it can play a role of cooling in daytime and preserving heat at night, thus reducing the damage of extreme temperature to crops and also improving soil moisture content. This study can provide reference for the application of gravel mulch to wind erosion protection in the other arid areas.

Keywords: gravel mulch; wind erosion; soil temperature and moisture; Hobq Desert

库布齐沙漠是中国第七大沙漠, 地处中国北方农牧交错带, 是中国北方重要的生态屏障, 也是生态脆弱带和荒漠化发展严重带^[1]。经过 40 a 各方面的努力, 库布齐沙漠治理取得了巨大的成就, 通过发展沙产业带动沙漠治理和生态恢复是库布齐沙漠治理的基本经验和突出特色^[2]。植物固沙是库布齐沙漠荒

漠化治理的重要措施^[3], 而机械固沙措施是植物固沙的重要辅助措施, 使固沙植物免受风蚀与沙埋, 同时可以改善沙地的水分状况, 有利于植物的成活与生长^[4]。砾石覆盖是一种重要的机械防沙措施^[5-6]。砾石对风沙活动的抑制作用早为人所知, 砾石面对底层水分和细沙物质具有保护作用, 被称为“黑色植

被”^[7];我国西北风蚀较严重的地区如甘肃中部地区很早就采用砾石覆盖的方式栽培作物^[8-9]。尝试将砾石覆盖固沙措施应用于库布齐沙漠治理开发中,例如在种植甘草、苦豆子等中蒙药材沙地进行砾石覆盖,防风蚀的同时还有助于提高药材产量,能更好地促进该区沙产业的发展。

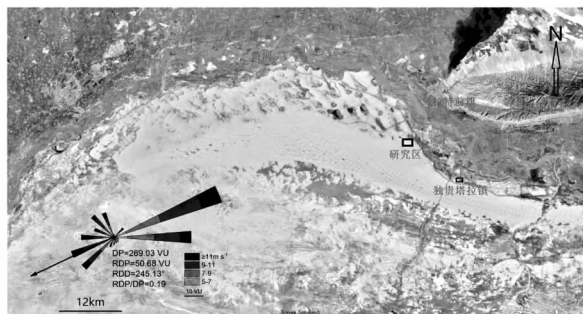
砾石作为天然不可蚀粗糙元能够显著地抑制风蚀的发生,这主要通过增加地表粗糙度,吸收和分解地表风动量,降低可蚀床面上的剪切力来抑制风蚀,即增大了砾石间沙粒的起动风速^[10-13]。另外,砾石覆盖还可减少风和地表土壤的直接作用面积,对可蚀地表形成保护^[14]。砾石覆盖度是评价砾石覆盖防沙工程防护效益的一个重要因子^[6,15-16]。Dong等^[17]从空气动力学角度探讨了砾石覆盖的防护效益,得出当砾石覆盖度在40%~50%以上时戈壁蚀余面达到稳定。不少学者探讨了砾石覆盖度对风蚀强度的影响,研究表明,风蚀强度随砾石覆盖度增加呈指数规律递减^[7,18-19]。王训明等^[20]研究了阿拉善高原戈壁地表风蚀强度与砾石覆盖度的关系后认为,40%盖度以下的戈壁地表其风蚀强度随着砾石覆盖度的增加而增大,这可能与低砾石盖度下,砾石周围的涡流侵蚀作用较强有关。风洞试验结果表明,砾石粒径对风蚀强度也会产生影响,小粒径砾石(如2 cm)要比大粒径砾石(如10 cm)风蚀防护效益要好^[21-22]。此外,砾石的排列方式也会对风蚀强度产生影响:刘连友等^[7]风洞试验表明,随机排列的砾石床面具有更好地抑制风蚀效应;然而,Brown等^[23]认为不可蚀粗糙元密度是风蚀防护的主控因子而不受排列方式的影响。综上所述,以往研究主要探讨砾石覆盖特征参数如砾石覆盖度、粒径和排列方式等对风蚀的影响,砾石覆盖防护效益主要是从防风固沙角度来考虑。虽然在中国西北地区砾石覆盖广泛应用于农田土壤保墒中,但关于砾石覆盖水土保持作用的系统研究较少^[24]。

本文对砾石覆盖防风固沙效益以及对土壤温湿度的影响进行试验研究,来综合分析砾石覆盖固沙措施的水土保持作用,旨在为砾石覆盖应用于库布齐沙漠开发治理中的风蚀防护提供科学依据。

1 研究区概况

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原脊线的北部,西、北、东三面均以黄河为界(图1)。库布齐沙漠以流动沙丘为主,面积占80%,类型以沙丘链和格状沙丘为主,一般高10~15 m^[25]。研究区位于鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇,属中温带干旱、半干旱气候区,具有明显的大陆性季风气候特征,年降水量150~250 mm,主要集中于7、8两

个月;年蒸发量2 100~2 700 mm,年平均气温6~7.5℃,积温3 000℃,无霜期122~144 d;沙尘暴天气日数在21~55 d,主要集中于春季^[26]。



验中的砾石。床面砾石按照叉排式结构铺设在风洞底面面板上,铺设总长度为4.8 m(图2)。

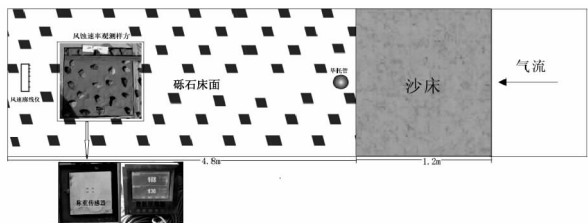


图2 风洞试验布局

2.2 土壤温湿度实地观测

砾石覆盖土壤温湿度观测试验在库布齐沙漠杭锦旗独贵塔拉镇开发沙地进行,选取观测样方,设置砾石覆盖机械防护措施处理(图3),并设置一空白对照,利用HOBO温湿度探头对0—5,10,30,50,100 cm深度土壤温湿度进行实时监测,数据采集间隔为15 min。砾石覆盖度在40%左右,砾石粒径约3 cm,均匀铺设砾石,铺设面积200 m²。

3 结果与分析

3.1 砾石覆盖防风固沙效应

3.1.1 防风效应 不同覆盖度砾石床面防风效应(W_R)用以下公式表示:

$$W_R = (1 - \frac{u_z}{u_{0z}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: u_z 为砾石床面不同高度风速; u_{0z} 为无砾石覆盖床面不同高度风速。 W_R 值越大表示砾石床面风速

相对于无砾石覆盖床面衰减越大,防风效应越好。 W_R 随砾石覆盖度的变化见图4。由图4可以看出,随着砾石覆盖度的增加风速衰减逐渐增大,砾石床面防风效应增强。在10~16 m/s时,当砾石覆盖度从10%增加到40%或50%时,风速衰减随砾石覆盖度的增加显著增大,防风效应增强,而该临界盖度以上风速衰减基本趋于稳定,表明砾石床面防风效应无显著变化。风速衰减主要发生地表以上0.9~2.2 cm高度范围内,2.2 cm以上高度砾石床面防风效应随砾石覆盖度增加而增强的变化趋势越来越小,到地表以上8.3 cm高度处砾石床面的防风效应已不明显。因此,10~16 m/s风速下,3 cm粒径砾石当砾石覆盖度达到40%或50%时,砾石床面即可取得较好的防风效应。



图3 库布齐沙漠沙地砾石覆盖处理

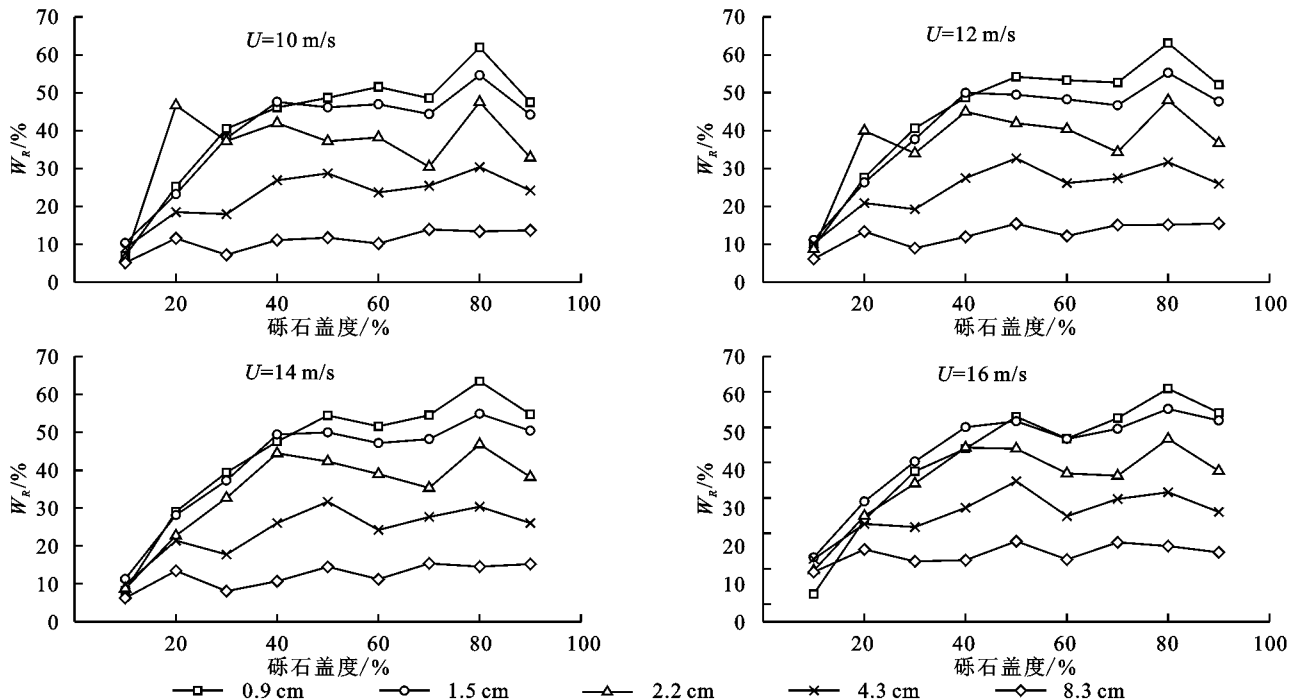


图4 不同试验风速(U)下防风效应 W_R 随砾石覆盖度的变化

空气动力学粗糙度是表征气流与地表相互作用的重要参数之一,对风沙活动产生重要影响^[27]。通

过对不同试验风速下不同覆盖度砾石床面空气动力学粗糙度的计算,计算方法采用Wiggs等^[28]计算空

气动力学粗糙度方法,结果表明,在10~16 m/s 试验风速下,空气动力学粗糙度随砾石覆盖度增加先增大后减小并趋于稳定(图5)。具体而言,10%~50%覆盖度范围内,空气动力学粗糙度随砾石覆盖度的增大而显著增大,到50%盖度达到最大值,50%盖度后,空气动力学粗糙度随砾石覆盖度增大而减小并趋于稳定。因此,从空气动力学的角度讲,增加砾石覆盖对空气动力学粗糙度的增大是有一定极限的,50%盖度后再增加砾石所起的防护作用不大,即3 cm 粒径砾石床面在50%盖度时达到空气动力学上的稳定。风速衰减达到最大时,空气动力学粗糙度同样达到最大,这表明空气动力学粗糙度增大是同高度风速随砾石覆盖度增大而衰减的内在原因,砾石床面随砾石覆盖度增大而风速衰减是床面粗糙度增大的直接表现。

3.1.2 防风蚀效应 不同覆盖度砾石床面防风蚀效应(E_R)用以下公式表示:

$$E_R = (1 - e_r / e_s) \times 100\% \quad (2)$$

式中: e_r 为砾石床面风蚀速率; e_s 为对照沙床风蚀速率。 E_R 值越大表示防风蚀效应越好。 E_R 值随砾石覆盖度的变化过程见图6。由图可见,10~16 m/s 试验风速下,10%~90%覆盖度砾石床面风蚀防护效果明显,防风蚀效应达49.4%~100%。当砾石覆盖度从10%增加到50%时, E_R 值显著增大,50%覆盖度以上砾石床面风蚀速率随砾石覆盖度增大而趋于稳定。具体而言,当砾石盖度达到40%时,各试验风速下砾石床面风蚀防护效应达93.8%~99.2%;50%盖度砾石床面风蚀防护效应达96.4%~100%。可见,理论上,10~16 m/s 风速下,3 cm 粒径砾石在50%覆盖度时即可达到理想的风蚀防护效果。

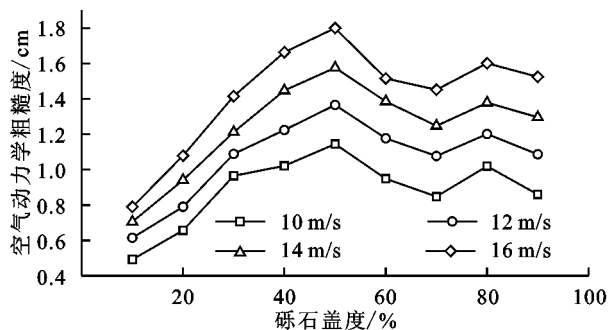


图5 空气动力学粗糙度随砾石盖度的变化

3.2 砾石覆盖对土壤温湿度的影响

3.2.1 土壤温度 以2016年4月14日—27日和2016年7月2日—15日各15 d砾石覆盖沙地与无砾石覆盖沙地0~5 cm和10 cm土壤温度随监测时间变化过程为例,来分析砾石覆盖对土壤温度的影响(图7)。由图7可见,砾石覆盖沙地相比无砾石覆盖对照沙地具有白天降温、夜间保温的作用。在4月份监测

时间段内,砾石覆盖沙地相比于无砾石覆盖对照沙地0~5 cm土壤白天最大降温达5.1~12.8℃,夜间最大增温可达1.3~5.2℃;而10 cm土壤温度白天最大降温达1.1~2.0℃,夜间最大增温可达0.05~0.2℃。

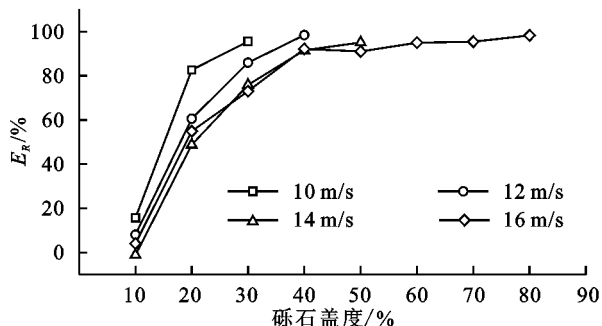


图6 风蚀防护效应(E_R)随砾石覆盖度的变化

相应的,7月份砾石覆盖沙地0~5 cm土壤温度白天最大降温达0.1~9.7℃,夜间最大增温可达0.7~6.0℃;而10 cm土壤温度白天最大降温达0.6~2.6℃,夜间最大增温可达0.6~4.2℃。以上结果表明,砾石覆盖沙地后,在白天土壤表层温度显著降低;7月份观测期间无砾石覆盖沙地土壤表层最高温度为41.3℃,而砾石覆盖沙地相应土壤温度为32.1℃,降低9.2℃;砾石覆盖层在夜间起保温作用,具有储热功能,防止低温对沙生植物的伤害;4月份观测期间无砾石覆盖土壤表层(0~5 cm)夜间最低温度为3.8℃,而砾石覆盖后夜间最低气温为6.3℃,提高2.7℃。可见,砾石覆盖使沙地土壤温度在白天与夜间的波动幅度降低,且随着土层深度的增加波动幅度减小。

3.2.2 土壤含水量 图8说明了2016年4月14日—27日砾石覆盖与无砾石覆盖对照沙地10 cm和30 cm深度土壤含水量随监测时间的变化过程。结果表明,砾石覆盖能显著的抑制蒸发,与无砾石覆盖沙地相比,砾石覆盖沙地土壤含水量变化速率明显降低。4月份在无降水的影响下,砾石覆盖沙地和无砾石覆盖沙地10 cm土壤含水量都随时间的推移逐渐降低,而对照沙地土壤含水量衰减速率明显大于砾石覆盖沙地,前者是后者衰减速率的1.9倍;相同时间段内,无砾石覆盖沙地30 cm土壤含水量随时间变化逐渐降低,而砾石覆盖沙地土壤含水量随监测时间延长基本保持不变。此外,无砾石覆盖沙地10 cm土壤含水量受蒸发影响具有明显的日变化规律,每日出现一波峰和波谷,而砾石覆盖沙地10 cm土壤含水量日变化规律相对不明显,这与砾石覆盖使地表蒸发减弱有关。

砾石覆盖3个月后,选取7月17日—31日时间段,对其30 cm与50 cm土壤含水量与无砾石覆盖对照沙地进行比较,结果表明,砾石覆盖沙地30 cm深

度土壤含水量是无砾石覆盖沙地的 1.1~1.5 倍;砾石覆盖沙地 50 cm 深度土壤含水量是无砾石覆盖沙

地的 1.0~2.3 倍(图 9)。可见,砾石覆盖能够显著地提高土壤含水量。

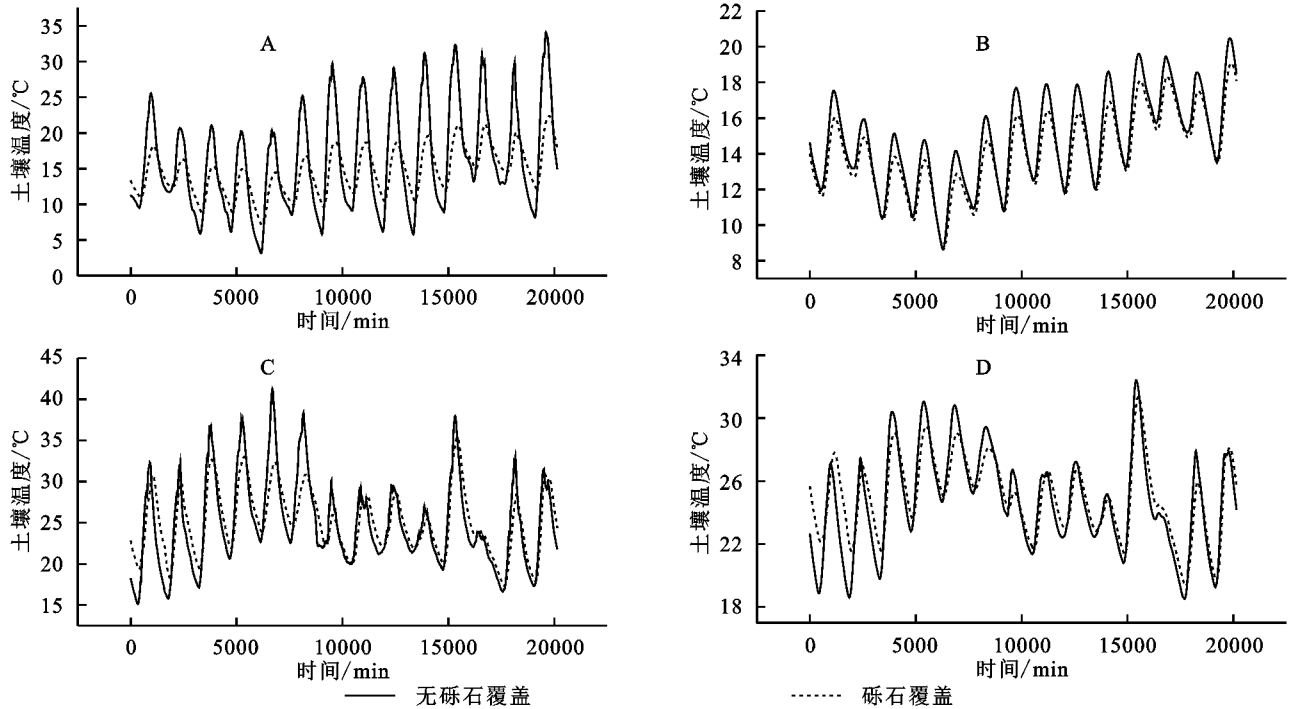


图7 4月(A-B)与7月(C-D)砾石覆盖沙地与无砾石覆盖沙地土壤温度变化过程

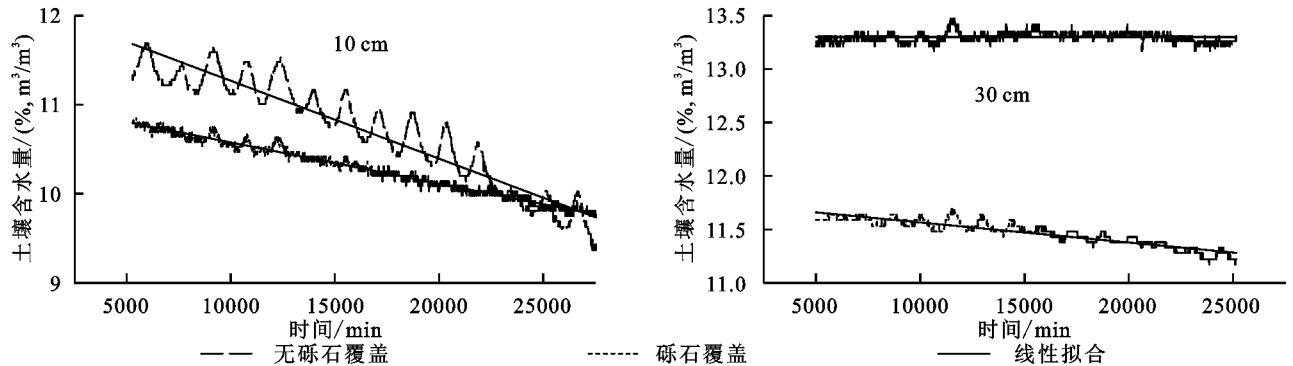


图8 2016年4月14日-27日砾石盖度沙地与无砾石覆盖沙地10 cm和30 cm土壤含水量变化趋势

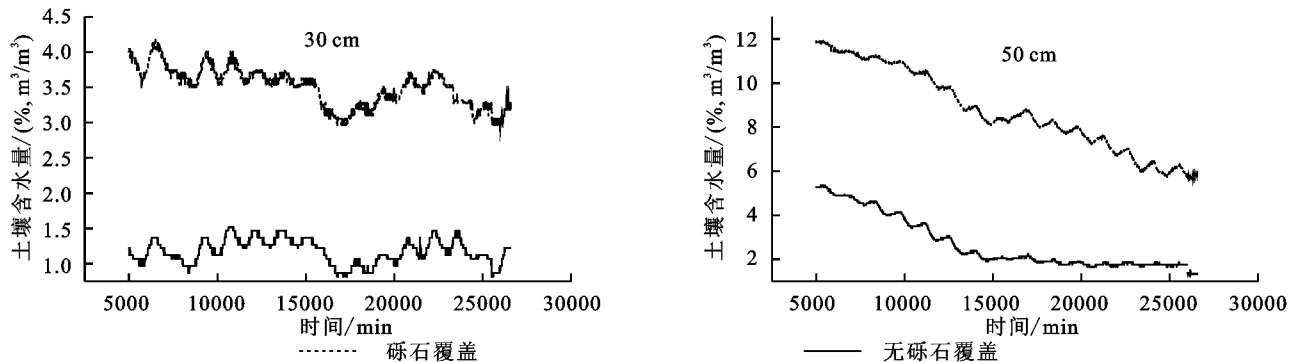


图9 2016年7月17日-31日砾石覆盖沙地与无砾石覆盖沙地30 cm和50 cm土壤含水量变化过程

4 讨论

砾石覆盖风蚀防护机理可以由剪切压分解理论来解释,即作用在不可蚀粗糙元覆盖地表的剪切压可以分解为作用在不可蚀粗糙元上和不可蚀粗糙元之

间的可蚀地表上两部分^[10]。剪切压的分解使作用在砾石间可蚀地表的剪切压减小,相应增大了砾石间可蚀地表的沙粒起动风速,从而抑制风蚀作用。研究表明,10%~90%覆盖度砾石使沙粒起动剪切风速增大了1.8~4.5倍^[19]。此外,砾石覆盖使可蚀床面的暴

露面积直接减小,即减小了风与跃移沙粒对可蚀床面的直接作用和冲击作用面积,从而直接减少风蚀量。从理论上讲,本研究结果表明,3 cm 粒径砾石在达到50%砾石覆盖度时就可取得理想的防风固沙效果,此盖度下风速消减与空气动力学粗糙度达到最大值,且风蚀防护效应在96%以上。砾石覆盖风蚀防护最优盖度一直是风沙物理和风沙工程学研究的热点问题。富宝锋等^[21]对砾石覆盖沙床风蚀防护效益进行了风洞试验研究,结果表明,55%砾石覆盖度后砾石床面风蚀防护效益趋于稳定。Wang 等^[29],张伟民等^[30]和王志强等^[22]认为60%砾石覆盖度后砾石床面风蚀防护效益趋于稳定。以上研究结果中最优砾石覆盖度的差异受试验风速影响较大,而且也受集沙仪收集效率的影响。因此,将砾石覆盖固沙措施应用于风蚀防护时,要充分考虑所应用地区的局地风况如最大风速。本研究中,应用称重传感器使地表风蚀速率实现了量化测量,因而不受集沙仪收集效率问题的影响,且试验风速与库布齐沙漠基本一致。此外,风沙防护工程上,防护措施在达到有效的风沙防护效果的同时还要使工程成本降到最低。40%覆盖度砾石床面风蚀防护效应在93%以上,从40%砾石覆盖度增加到50%,风蚀防护效应只提高3%。因此,兼顾风沙工程成本和防护效益,笔者认为3 cm 粒径砾石、40%覆盖度砾石覆盖固沙措施应用于库布齐沙漠风蚀防护能够起到较好的效果。

砾石覆盖除消减风速、降低风蚀量外,其还具有蓄热功能,好比天然的塑料薄膜,减少低温伤害,有利于作物根系生长;并能使土壤结冻期推迟,解冻期提前,这对喜温作物来说,不仅能丰产,还能提前成熟,改善其品质。砾石覆盖割断了土壤通向大气的毛细管,毛管作用被破坏,抑制土壤蒸发;沙地表面减少了毛管上升水,蒸发方式主要为蒸汽扩散以及植物蒸腾^[31]。此外,砾石覆盖能够增加降雨入渗量,减小径流和改善土壤结构,从而有效的提高土壤含水量^[32]。Li 等^[24]研究表明,砾石覆盖能够显著地提高土壤含水量,特别是20—60 cm 深度土壤。本研究土壤温湿度观测中砾石覆盖度的设置主要从防风蚀角度来考虑,今后需深入研究不同粒径、覆盖度砾石床面对土壤温湿度的影响。

5 结论

沙地开发必须有一定的风沙防护措施,砾石覆盖不仅能够防风固沙,而且对土壤具有保湿保温作用。风洞试验表明,理论上3 cm 粒径砾石在50%盖度时即可达到理想的防风固沙效果:空气动力学粗糙度达到最大

值,风蚀防护效应在96%以上。结合库布齐沙漠风况特征以及砾石覆盖应用成本,3 cm 粒径砾石在40%覆盖度时,风蚀防护效应在93%以上,能够起到较好的风蚀防护效果,同时对土壤具有较好的保墒作用。

参考文献:

- [1] 蒙古军,张彦儒,周平. 中国北方农牧交错带生态脆弱性评价:以鄂尔多斯市为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 850-856.
- [2] 韩新盛,郭晓川,李敏. 基于生态产业链的库布其沙漠沙产业产业集群发展模式研究[J]. 科学管理研究, 2015(5): 55-58.
- [3] 王文彪. 库布其沙漠固沙造林[M]. 呼和浩特:内蒙古大学出版社, 2013.
- [4] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [5] 韩致文,王涛,董治宝,等. 风沙危害防治的主要工程措施及其机理[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 13-21.
- [6] Zhang W M, Tan L H, Zhang G B, et al. Aeolian processes over gravel beds: Field wind tunnel simulation and its application atop the Mogao Grottoes, China[J]. Aeolian Research, 2014, 15: 335-344.
- [7] 刘连友,刘玉璋,李小雁,等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应[J]. 中国沙漠, 1999, 19(1): 60-62.
- [8] Li X Y, Liu L Y, Gong J D. Influence of pebble mulch on soil erosion by wind and trapping capacity for wind-blown sediment[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 59(3): 137-142.
- [9] 陈年来,刘东顺,王晓巍,等. 甘肃砂田的研究与发展[J]. 中国瓜菜, 2008, 21(2): 29-31.
- [10] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 8: 269-292.
- [11] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion of erodible surfaces[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 1989, 94(D10): 12885-12893.
- [12] Raupach M R, Gillette D A, Leys J F. The effect of roughness elements on wind erosion threshold[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 1993, 98(D2): 3023-3029.
- [13] Lancaster N, Nickling W G, Gillies J A. Sand transport by wind on complex surfaces: Field studies in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(F3): F03027.
- [14] 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟[J]. 农业工程学报, 2010, (11): 151-155.
- [15] Liu B L, Zhang W M, Qu J J, et al. Controlling wind-blown sand problems by an artificial gravel surface: A case study over the gobi surface of the Mogao Grottoes [J]. Geomorphology, 2011, 134(3): 461-469.

- [16] Wang W F, Dong Z B, Wang T, et al. The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. *Environmental geology*, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [17] Dong Z B, Qu J J, Liu X P, et al. Experimental investigation of drag coefficients of gobi surfaces[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(7): 609-615.
- [18] Fryrear D W. Soil cover and wind erosion[J]. *Transactions of the ASAE; American Society of Agricultural Engineers(USA)*, 1985, 28(28): 781-784.
- [19] 谭立海, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石覆盖度戈壁床面风蚀速率定量模拟[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 581-588.
- [20] 王训明, 郎丽丽, 花婷, 等. 戈壁砾石覆盖度与风蚀强度关系试验研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 313-319.
- [21] 富宝锋, 赵耀林, 何艺峰, 等. 砾石覆盖沙床防风蚀效果风洞试验[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 91-94.
- [22] 王志强, 富宝锋, 何艺峰, 等. 砾石覆盖对土壤风蚀防护效率的风洞模拟研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 90-93.
- [23] Brown S, Nickling W G, Gillies J A. A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003—2012), 2008, 113(F2): 154-162.
- [24] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2): 105-127.
- [25] 朱震达, 吴正. 中国沙漠概论[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [26] 吴正. 中国沙漠及其治理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] Greeley R, Iversen J D. Wind as a geological process [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [28] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Kalahari Desert [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(1): 19-34.
- [29] Wang W F, Dong Z B, Wang T, et al. The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China[J]. *Environmental Geology*, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [30] 张伟民, 谭立海, 张克存, 等. 不同砾石覆盖度床面蚀积过程的野外风洞试验研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(11): 1370-1376.
- [31] Mehuys R G, Stolzy L H, Letey J, et al. Temperature distributions under stones submitted to a diurnal heat wave[J]. *Soil Science*, 1975, 120(120): 437-441.
- [32] 李小雁. 干旱半干旱过渡带雨水集流试验与微型生态集雨模式[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2000.



(上接第 171 页)

- [15] 关松, 窦森, 胡永哲, 等. 添加玉米秸秆对黑土团聚体碳氮分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 187-191.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [17] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007(9): 1973-1979.
- [18] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对土壤水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [19] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993(20): 1896-1899.
- [20] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 221-226.
- [21] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 293-300.
- [22] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676.
- [23] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 141-145.
- [24] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice—wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [25] 吕元春, 薛丽佳, 尹云锋, 等. 外源新碳在不同类型土壤团聚体中的分配规律[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 534-539.
- [26] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418.
- [27] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—Effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22(7/8): 755-775.
- [28] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 26(6): 2642-2650.